

## НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

Б.К. Сеничкин<sup>1</sup>, Е.В. Ушерова<sup>1</sup>, Н.А. Спирин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический  
университет имени Г.И. Носова»  
(г. Магнитогорск, Россия)

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
(г. Екатеринбург, Россия)

*Приведена схема энергосбережения, рассмотрены внешние и технологические принципы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в доменной печи. Приведены результаты исследований нестационарности доменного процесса и способ стабилизации температурного поля шахты доменной печи*

**Ключевые слова:** доменная печь, природный газ, кокс, технический кислород.

*In this article summarizes an energy resource conservation scheme and examines the external and technological principles of energy efficiency in a blast furnace. The results of the research which follow, indicate the instability of the blast furnace operation itself, as well as the method for stabilizing the temperature range of the blast furnace stack.*

**Keywords:** blast furnace, natural gas, coke, technical oxygen.

Развитие технологии доменной плавки направлено в основном на снижение расхода энергоресурсов, сокращение простоев и увеличение интенсивности работы печи. Все эти вопросы непосредственно связываются с заменой дефицитного кокса другими видами топлива. В целях снижения удельного расхода кокса и повышения качества чугуна проводятся различные организационные и технологические мероприятия, которые обеспечивают улучшение технико-экономических показателей доменной плавки. Все эти мероприятия по-разному влияют на доменный процесс. Первая группа мероприятий – внешняя – позволяет за счет обогащения, офлюсования и окомкования шихты вывести значительную долю эндотермических процессов из доменной печи (рис. 1).

Это приводит к уменьшению теплотребления при выплавке чугуна, снижает расход кокса, понижает выход шлака и улучшает газодинамические характеристики столба шихтовых материалов.

Вторая группа – технологическая, активная – позволяет оперативно влиять на технологический процесс плавки, воздействуя тем самым на потребление энергии (тепловой и химической). Эти мероприятия в большинстве случаев основываются на разработке и реализации рациональных газодинамических, тепловых и топливных режимов.

Рациональное распределение шихтовых материалов по сечению печи определяется многими факторами. Однако наиболее оперативными и достаточно эффективными являются параметры загрузки.



Рис. 1. Схема энергосбережения в доменной печи

В настоящее время успешно внедряется бесконусная загрузка, позволяющая оперативно влиять на распределение материалов по сечению шахты доменной печи. Но большинство доменных печей России до сих пор имеют старую систему конусного загрузочного аппарата.

Известно, что для печей с конусной загрузкой газодинамика столба шихтовых материалов определяется не только их фракционным составом, но и параметрами загрузки (уровнем засыпи и системой загрузки). Исследованиями [1] установлено, что положением гребня шихты эффективно регулируется уровень засыпи.

Как показали исследования, наиболее устойчивая и экономичная работа печи, при прочих равных условиях, наблюдается при уровне засыпи, располагающемся на 0,2–0,3 м ниже зоны удара кусков шихты о стенку. Понижение уровня засыпи, предусмотренное программой исследования, способствовало стабилизации анализируемых параметров. Значительно изменились колебания содержания кремния в чугуна. Пределы изменения его снизились на 0,2 % для печи № 7 ММК и на 0,1 % для печи № 1 НТМК. Соответственно уменьшилась амплитуда колебаний средней температуры колошникового газа. Понижение пределов ее колебаний составило 45 °С для доменной печи № 7 (1,7 раза) и 41 °С – для доменной печи № 1 (1,8 раза). Важно также и то, что для последней печи наблюдалось некоторое повышение содержания ванадия в чугуна при одновременном сужении интервалов его изменений.

Скрытые резервы по снижению энергозатрат существуют и в связи с нестационарностью доменного процесса, обусловленной цикличностью отработки продуктов плавки из печи. Существующая практика периодической отработки продуктов плавки при непрерывном доменном процессе вызывает колебания скорости схода шихты и вносит существенные возмущения в тепловой и газодинамический режимы [2]. Особенно велико это влияние в периоды переполнения горна чугуном и шлаком из-за задержек выпуска чугуна из печи [3].

Колебания скорости схода шихты, связанные с цикличностью выпуска чугуна и шлака, вносят нестационарность в процессы, проходящие в столбе шихтовых материалов. Изменение скорости схода шихтовых материалов оказывает влияние и на газодинамические характеристики столба шихты. В большинстве случаев во время выпуска чугуна наблюдалось понижение давления горячего дутья и частных перепадов давления по высоте печи на 0,010–0,015 МПа. В условиях стабилизированных параметров комбинированного дутья изменение расхода шихтовых материалов оказывает определенное влияние на ход процессов теплообмена и восстановления. Это подтверждается характерными колебаниями состава и температуры колошникового газа между смежными выпусками. Нестационарность температурного поля шахты доменной печи позволяют несколько иначе рассматривать вопрос о стабилизации расхода дутья и природного газа. При стабилизированных параметрах комбинированного дутья теплоемкость газового потока остается постоянной независимо от изменений теплоемкости опускающегося потока шихтовых материалов. Как показали исследования [4], для стабилизации температурного поля шахты печи необходимо управлять параметрами комбинированного дутья (расход и влажность природного газа). Знак корректирующего воздействия должен соответствовать знаку изменения теплоемкости шихтового потока. Ликвидация нестационарности теплообменных процессов путем стабилизации отношения теплоемкостей потоков шихты и газа коррекцией расхода природного газа и дутья позволяет повысить производительность печи на 1,5–2,0 % и снизить удельный расход кокса до 3 %.

Колебания скорости схода шихты, связанные с цикличностью выпуска чугуна и шлака, вносят нестационарность в процессы, проходящие в столбе шихтовых материалов. И действительно, практически во всех случаях перед выпуском чугуна наблюдалось повышение температур в шахте печи, рост упругости дутья, увеличение частных перепадов давлений.

Экспериментальная проверка [5] была проведена на доменной печи № 7 ММК. В качестве воздействия, регулирующего температуру газов, использовалось изменение влажности комбинированного дутья. Увлажнение дутья проводилось за 40–50 мин до начала выпуска чугуна. Началом повышения влажности дутья и дополнительного топлива, вдуваемого в доменную печь, является момент изменения знака производной верхнего, нижнего и общего перепадов давления на положительный. В момент начала выпуска чугуна увлажнение комбинированного дутья прекращалось. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Кроме того, существенно (в 2–3 раза) снизилась скорость роста температуры газового потока на входе в верхнюю ступень теплообмена (рис. 2). Скорость подъема температуры в шахте печи до подачи влаги в среднем составляла 2,12 град/мин, а во время подачи снизилась до 0,49 град/мин, кроме того в опытном периоде зарегистрировано в 6 раз меньше подвисаний шихты. Удельный расход кокса при регулировании влажности уменьшился на 8–16 кг при практически неизменном соотношении расходов природного газа и технологического кислорода.

Таблица 1

## Показатели работы доменной печи № 7 ММК в опытном и контрольных периодах

Показатель	1-й контроль- ный	Опытный	2-й контроль- ный
Выплавка чугуна, т/сут	3044	2999	3060
Выход шлака кг/т чугуна	371	377	339
Коэффициент использования полезного объема (КИПО)	0,444	0,467	0,45
Удельный расход:			
кокса, кг	486	470	478
природного газа, м <sup>3</sup>	98,9	94,8	88,4
технологического кислорода, м <sup>3</sup>	96	91,4	89
Влажность дутья, г/м <sup>3</sup> дутья	19,2	20,4	20
Содержание Fe в шихте, %	58,4	58,23	58,76
Содержание Si в чугуне, %	0,67	0,77	0,67
Содержание S в чугуне, %	0,0183	0,0177	0,0207

Увлажнение комбинированного дутья более целесообразно проводить за счет повышения влажности дополнительного топлива (природного, коксового газа). Такой способ увлажнения дутья улучшает условия окисления метана без выделения сажистого углерода, повышает эффективность использования вдуваемых в печь углеводородов и улучшает технико-экономические показатели работы доменной печи.

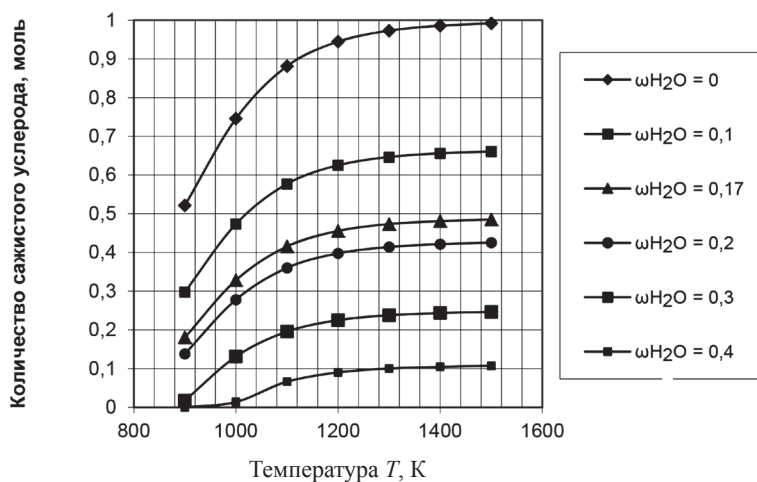


Рис. 2. Влияние температуры на образование сажистого углерода при разложении метана при различном увлажнении природного газа

Для уменьшения доли природного газа, подвергшегося разложению, предложено вместо увлажнения дутья подавать водяной пар вместе с природным газом. При этом считаем, что происходит идеальное перемешивание природного газа с водой [6]. В результате раскрытия струи увлажненного природного газа в фурме протекают следующие реакции (для упрощения примем состав природного газа 100 %  $\text{CH}_4$ ):

1.  $\text{CH}_{4\text{r}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{r}} = \text{CO}_{\text{r}} + 3\text{H}_{2\text{r}}$
2.  $\text{CH}_{4\text{r}} = \text{C}_{\text{rp}} + 2\text{H}_{2\text{r}}$
3.  $2\text{CH}_{4\text{r}} + \text{O}_{2\text{r}} = 2\text{CO}_{\text{r}} + 4\text{H}_{2\text{r}}$
4.  $2\text{H}_{2\text{r}} + \text{O}_{2\text{r}} = 2\text{H}_2\text{O}_{\text{r}}$

Расчет изменения энергии Гиббса  $\Delta G^\circ_{\text{r,T}}$  произведен по [7, 8]. Результаты расчета приведены в табл. 2. Из результатов расчета следует, что в реакциях 1, 3 и 4 равновесие необратимо смещено в сторону прямой реакции, поэтому расчет этих реакций производится по законам стехиометрии. Реакция пиролиза метана термодинамически обратима, поэтому расчет количества образовавшегося углерода определялась из условий равновесия.

Таблица 2

Значения изменения энергии Гиббса

Реакция	$\Delta G^\circ_{\text{r,T}}$ кДж/моль·К, при температуре, К				
	298,16	600	900	1200	1500
$\text{CH}_{4\text{r}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{r}} = \text{CO}_{\text{r}} + 3\text{H}_{2\text{r}}$	142,32	72,42	–2,00	–78,06	–154,48
$\text{CH}_{4\text{r}} = \text{C}_{\text{rp}} + 2\text{H}_{2\text{r}}$	50,41	21,24	–11,19	–45,88	–82,25
$2\text{CH}_{4\text{r}} + \text{O}_{2\text{r}} = 2\text{CO}_{\text{r}} + 4\text{H}_{2\text{r}}$	–86,60	–141,91	–200,39	–259,78	–319,13
$2\text{H}_{2\text{r}} + \text{O}_{2\text{r}} = 2\text{H}_2\text{O}_{\text{r}}$			–198,30	–181,63	–164,34

В результате неравномерного смешивания газа с дутьем возникают участки с различной концентрацией кислорода (в частности нулевой в центре раскрывающейся струи).

В участках, где отсутствует кислород, в первую очередь будет протекать реакция взаимодействия метана с водой. Оставшийся после этой реакции метан будет подвергаться пиролизу. При разложении моля  $\text{CH}_4$  образуется  $x$  моль углерода и две моли водорода, тогда равновесные количества вещества  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  равны соответственно:

$$n_{\text{CH}_4}^{\text{p}} = n_{\text{CH}_4} - x, \quad n_{\text{H}_2}^{\text{p}} = n_{\text{H}_2} - 2x, \quad n_{\text{CO}}^{\text{p}} = n_{\text{CO}} - x, \quad (1)$$

где  $n_{\text{CH}_4}$ ,  $n_{\text{H}_2}$ ,  $n_{\text{CO}}$  – количество молей метана, водорода и оксида углерода после реакции взаимодействия метана с водой, рассчитываются в зависимости от принятого значения объемной доли воды в смеси с природным газом.

Объемные доли  $w_{\text{CH}_4}^p$  и  $w_{\text{H}_2}^p$  при равновесии определяются по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} w_{\text{CH}_4}^p &= \frac{n_{\text{CH}_4}^p}{n_{\text{CH}_4}^p + n_{\text{H}_2}^p + n_{\text{CO}}^p} \\ w_{\text{H}_2}^p &= \frac{n_{\text{H}_2}^p}{n_{\text{CH}_4}^p + n_{\text{H}_2}^p + n_{\text{CO}}^p} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Равновесные парциальные давления  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$  определяются по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{CH}_4}^p &= P_{\text{дутья}} - w_{\text{CH}_4}^p \\ P_{\text{H}_2}^p &= P_{\text{дутья}} - w_{\text{H}_2}^p \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Уравнение константы равновесия для реакции пиролиза метана имеет вид:

$$K_p = (P_{\text{H}_2}^p)^2 / (P_{\text{CH}_4}^p)^2. \quad (4)$$

Используя приведенные выше выражения и значения константы равновесия при температуре  $T$ , получим уравнение с одним неизвестным, решение которого позволяет определить количество молей углерода, образовавшегося при пиролизе метана. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Как следует из результатов расчетов, с ростом температуры увеличивается количество молей сажистого углерода, причем, чем больше увлажнен газ, тем меньше образуется углерода.

Концентрация углерода в газовой фазе в зависимости от температуры определится по формуле

$$\{C\} = \frac{x \cdot 12 \cdot P}{(1 + x) \cdot 8,31 \cdot T}, \text{ г/м}^3. \quad (5)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Концентрация сажистого углерода в газовой фазе

Объемные доли $\text{H}_2\text{O}$ в смеси с $\text{CH}_4$ и $\text{H}_2\text{O}$	{C}, г/м <sup>3</sup> , при температуре, К						
	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
0	167,1	187,5	186,9	177,7	166,5	155,6	145,7
0,1	111,9	141,1	146,0	140,7	132,6	124,2	116,4
0,17	74,5	108,5	117,1	114,5	108,4	101,8	95,6
0,2	59,2	95,5	105,7	104,1	98,9	93,0	87,3
0,3	8,3	50,8	65,3	67,2	64,8	61,4	57,9
0,4	0,0	6,0	30,4	30,2	30,7	29,7	28,3

Как следует из результатов расчетов, концентрация углерода в газовой фазе тем ниже, чем более увлажнен природный газ.

При рассмотрении участков, в которых присутствует воздух, расчет стехиометрических реакций проведен с учетом взаимодействия метана, как с водой, так и с кислородом. Расчеты показали, что при объемной доли воздуха в смеси с природным газом от 0,3 до 0,4 сажистый углерод не образуется при увлажнении газа до 40 %, при объемной доли 0,5 пиролиз не происходит уже при 30 % увлажнении. Выпадение сажистых частиц при объемной доли воздуха, равной 0,6, возможно только в случае увлажнения природного газа от 0 до 10 %, при 0,7 образование углерода полностью прекращается.

Для всех случаев также была рассчитана степень пиролиза природного газа  $R$  (%), т.е. величина, показывающая какая часть введенного в фурму газа разложилась с образованием сажистого углерода. Термодинамический анализ процесса пиролиза природного газа в фурме доменной печи показал, что при введении водяного пара в тракт природного газа вместо увлажнения дутья снижается степень пиролиза с 99,19 % до 73,49 % в центре струи, уменьшается концентрация углерода в газовой фазе с 145,72 до 95,57 г/м<sup>3</sup>. Это значит, что 25,7 % из той части природного газа, которая может подвергаться термическому разложению, будет заменять углерод кокса в горне, что позволит снизить расход кокса.

#### Список использованных источников

1. Сеничкин Б.К., Овчинников Ю.Н., Китаев Б.И. и др. К вопросу об оптимальном уровне насыпи // *Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов*. – Свердловск, 1980.
2. Овчинников Ю.Н., Сеничкин Б.К., Китаев Б.И. и др. Цикличная нестационарность теплового состояния шахты доменной печи // *Известия вузов ЧМ*. – 1974. – № 6.
3. Сеничкин Б.К., Воскобоева Л.Н., Кириллов А.В. Изменение температуры в шахте печи в связи с циклом «накопление-выпуск» продуктов плавки // *Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов: Межвуз. сб. науч. тр.: Вып. 10 / МГМИ*. – Свердловск: Изд. УПИ, 1987.
4. Овчинников Ю.Н., Спирин Н.А., Новиков В.С. и др. Исследование нестационарных процессов в доменных печах. *Металлургическая теплотехника и теплофизика. Труды вузов РСФСР*, 1976.
5. Стабилизация нагрева горна цикличным изменением влажности дутья / Б.К. Сеничкин, Н.Н. Бабарыкин, Г.В. Горбунов и др. // *Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов*. – Свердловск, 1986.
6. Ушерова Е.В., Сеничкин Б.К. Термодинамический анализ процесса пиролиза увлажненного природного газа в фурме доменной печи. *Материалы 7-й всероссийской научно-практической конференции энергетики и металлургии настоящему и будущему России*. – Магнитогорск, 2006.
7. Есин О.А., Гельд П.В. *Физическая химия пирометаллургических процессов. Часть 1*. – Свердловск: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной металлургии, 1962. – 671 с.
8. Рабинович Г.Б., Васильев С.В., Врублевский В.В. Состав газовой смеси в полости фурмы доменной печи. *Доменное производство. Тематический отраслевой сборник № 2*. – М.: Металлургия, 1975. – 180 с.